黄河上游生态脆弱区复合生态系统韧性时空分异
——以宁夏为例

杨 航， 侯景伟， 马彩虹， 杨 晨， 王彦卷

（宁夏大学地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021）

摘 要：提升生态脆弱区抗扰动和恢复能力是生态文明建设的重要内容。构建基于经济、社会、自然多维视角的复合生态系统韧性评估模型，利用熵值法和GIS空间分析法，对2010—2020年宁夏复合生态系统韧性进行时空差异性分析，借助耦合协调模型、相关性分析和障碍度模型诊断影响生态韧性提升的关键因素。结果表明：(1) 宁夏复合生态系统韧性水平呈上升态势，但整体水平较低，经济韧性增速最快。高经济韧性北部密集分布，高社会韧性以市区为中心成片分布，高自然韧性主要连片分布在东、南、西、北四角，北部复合生态系统韧性高于中部和南部。(2) 宁夏复合生态系统的耦合度较高、但协调度偏低，研究时段内耦合协调度提升缓慢，大部分区县仍处于严重失调和中等失调状态。(3) 经济结构与经济潜力、基础设施、民生改善、自然环境表现出很强的正相关性。准则层中人口数量、环境压力、经济活力对复合生态系统韧性提升产生较大影响，指标层中综合能源消耗量和交通仓储邮政人员数对大部分区县韧性提升有较大影响。今后需积极发挥各影响因素的正向协同效应，快速提升宁夏复合生态系统韧性，以有效助力黄河流域生态保护和高质量先行区建设。

关键词：复合生态系统韧性；耦合协调度；相关性分析；障碍度模型；生态脆弱区；黄河上游

生态脆弱区一般位于两种不同类型生态系统交接过渡区域，中国中度以上生态脆弱区面积约占陆地总面积的55%，主要分布在北方干旱半干旱区、青藏高原、西南山地、南方丘陵、东部沿海水陆交接地区[1-3]。生态脆弱区在多源风险和多变扰动下，一般具有不稳定的内部结构，对外界干扰具有很强的敏感性，使生态问题日趋严重，如水土流失加剧、荒漠化加速、生物多样性锐减、环境承载力下降等[4-5]。生态脆弱区生态问题存在一定的不确定性，可以借助生态韧性理论进行研究[6]。生态韧性强调对冲击、干扰的吸收、抵抗、适应和恢复能力[7-8]。近几年对韧性概念[9]、韧性评价[10]、灾害韧性应对等的研究成果为生态韧性研究提供了理论支撑[11]。常见的生态韧性评估模型包括压力—传导—潜力[12]、抵抗力—适应力—恢复力[13]、规模—形态—密度[14]等。生态韧性的研究多聚焦于城市，而对生态脆弱区的研究很少，对黄河上游生态脆弱区生态韧性的研究鲜见报道。生态韧性的评价指标主要包括景观指数、生态系统服务价值、“源—汇”理论等[15]，经济和社会指标较少，很少关注指标之间的相关性、生态韧性内部耦合协调性、障碍度和时空分异性，从而难以准确揭示生态韧性机理[16-17]。因此，开展黄河上游地区复合生态系统韧性时空分异研究，能够拓展生态韧性、生态文明等理论视野，为黄河上游生态脆弱区的生态韧性提升提供理论支撑。

宁夏地处北方农牧交错生态脆弱区，自然环境较为恶劣，自然灾害频繁发生，易造成重大的人员及经济损失。宁夏作为西北地区和黄河上游重要的生态安全屏障，承担着维护西北乃至全国生态安全的重要使命，同时宁夏是唯一全境属于黄河的省份，作为建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区，应具备抵抗不确定风险的扰动能力和承受风险后的恢复能力。宁夏的地理位置、生态环境、生态脆弱性、经济发展等与黄河上游地区相似，因此，本

收稿日期：2022-08-09； **修订日期：**2022-10-02
基金项目：宁夏自然科学基金项目(2022AAC03055)资助
作者简介：杨航(1998-)，女，在读硕士，主要从事空间技术与分析研究. E-mail: yanghang0905@163.com
通讯作者：侯景伟. E-mail: hjwei2005@163.com

文拟选择宁夏作为黄河上游生态脆弱区的典型区域开展研究，构建宁夏复合生态系统韧性评价体系，利用熵值法、耦合协调模型、相关性分析和障碍度模型，对其复合生态系统韧性进行评估，探索时空演化过程，诊断影响复合生态系统韧性提升的关键因素，为黄河上游生态脆弱区对抗不确定风险、生态恢复和提升分区治理能力提供一定的决策参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区与数据

宁夏位于104°17′~107°29′E，35°14′~39°23′N，地处黄河上游，境内有贺兰山、罗山、六盘山。宁夏属于温带大陆性气候，干旱少雨，年降水量为166.9~647.3 mm；年均气温5.3~9.9 ℃，年蒸发量1312~2204 mm；以干草原和荒漠草原为主，植被覆盖度低，草原退化和沙化严重，水资源短缺，水土流失严重。周围被毛乌素沙地、腾格里沙漠、黄土高原、乌兰布和沙漠围绕。根据其生态基础将其划分为北部绿色发展区、中部封育保护区、南部水源涵养区[18]（图1）。

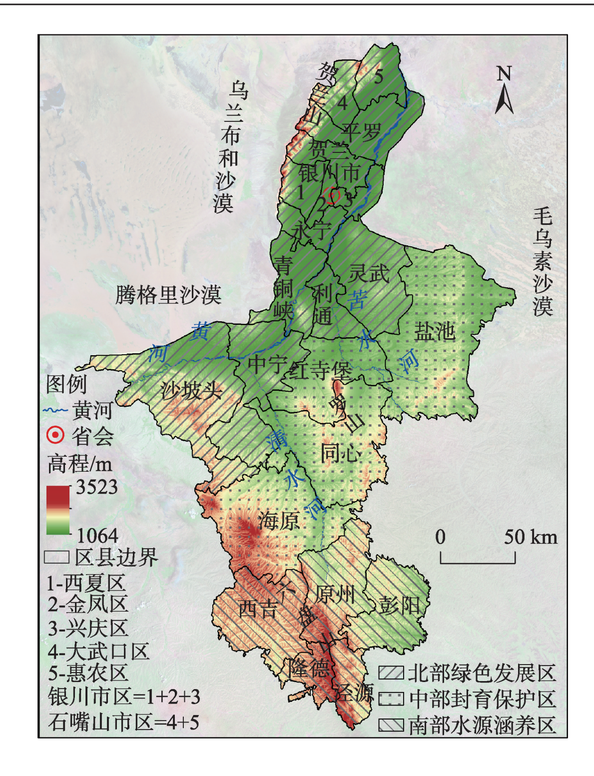
采用的数据（表1）主要来自于《宁夏回族自治区统计年鉴》(2011—2021年)以及宁夏回族自治区各县（市、区）统计年鉴和公报，个别缺失数据根据指数平滑法进行补齐，将各种自然数据的最小单位均转换为县区尺度。DEM高程数据来自地理空间数据云平台的GDEMV2 30 m×30 m分辨率栅格数据。

1.2 指标体系构建

基于韧性城市[19]、生态脆弱性[20-21]、“乡土—生态”韧性[22]等理论，筛选能够直观全面评价宁夏复合生态系统韧性的指标和准则层。同时结合宁夏实际情况，如宁夏属于干旱与半干旱气候，以干草原和荒漠草原较多，故将常用指标林地转换为草地；宁夏水资源匮乏，故选用水利环境基础设施投入指标，构建宁夏复合生态系统韧性评价体系[23]（表1）。

1.3 复合生态系统韧性评价模型构建

假设研究区某区县第i年份第j项指标的值为x_{ij}，构建m(指标)×n(年份/城市)的矩阵。复合生态系统韧性评价模型构建如下：



注：底图采用宁夏回族自治区自然资源厅标准地图制作，审图号为宁S[2019]第018号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

$$R = R_{eco} + R_{soc} + R_{nat} \tag{1}$$

$$R_{eco} = \sum_{j=1}^{9} w_j p_{ij}, R_{soc} = \sum_{j=10}^{18} w_j p_{ij}, R_{nat} = \sum_{j=19}^{27} w_j p_{ij} \tag{2}$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m} d_j} \tag{3}$$

$$d_j = 1 - e_j \tag{4}$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=0}^{n} p_{ij} \ln(p_{ij}) \tag{5}$$

$$p_{ij} = \frac{X_{xj}}{\sum_{j=1}^{m} X_{xj}} \tag{6}$$

$$X_{xj} = \begin{cases} \dfrac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\}} (x_{ij}\text{为正向指标}) \\ \dfrac{\max\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \cdots, x_{nj}\}} (x_{ij}\text{为负向指标}) \end{cases} \tag{7}$$

式中：R_{eco}、R_{soc}、R_{nat}、R分别为经济韧性指数、社会韧性指数、自然韧性指数和复合生态系统韧性指数；利用自然间段点法将韧性水平划分为低韧性、中等韧性、高等韧性3类。w_j为j指标的权重，采用熵值法

表1　宁夏生态脆弱区复合生态系统韧性评价体系构建

Tab. 1　Construction of resilience evaluation system of composite ecosystem in ecological fragile areas in Ningxia

目标层	准则层	指标层		属性	权重
经济韧性(A1)	经济结构(B1)	非私营企业平均工资/元	(C1)	+	0.0357
		规模以上工业企业数/个	(C2)	+	0.0367
		社会消费品零售额/10^8元	(C3)	+	0.0392
	经济活力(B2)	财政预算收入/10^8元	(C4)	+	0.0382
		地区生产总值/10^8元	(C5)	+	0.0388
		人均可支配收入/元	(C6)	+	0.0362
	经济潜力(B3)	第三产业比重/%	(C7)	+	0.0353
		教育投入/10^4元	(C8)	+	0.0388
		一般公共预算支出/10^8元	(C9)	+	0.0364
社会韧性(A2)	基础设施(B4)	床位数量/张	(C10)	+	0.0387
		交通仓储邮政业人数/人	(C11)	+	0.0390
		水利环境基础设施投入/10^4元	(C12)	+	0.0382
	民生改善(B5)	农作物产量/($kg\cdot hm^{-2}$)	(C13)	+	0.0354
		在岗职工数/人	(C14)	+	0.0390
		自来水受益村/个	(C15)	+	0.0370
	人口要素(B6)	常住人口数/人	(C16)	+	0.0379
		人口增长率/%	(C17)	+	0.0351
		卫生技术人员数/个	(C18)	+	0.0392
自然韧性(A3)	环境压力(B7)	工业二氧化硫排放量/t	(C19)	-	0.0321
		生活废水排放量/10^4t	(C20)	-	0.0320
		生活烟尘排放量/t	(C21)	-	0.0322
	生态治理(B8)	废气处理设施/套	(C22)	+	0.0382
		工业固体垃圾综合利用量/t	(C23)	+	0.0388
		生活污水处理吨数/t	(C24)	+	0.0379
	自然环境(B9)	草地/hm^2	(C25)	+	0.0367
		降水量/mm	(C26)	+	0.0376
		综合能源消费量/吨标准煤	(C27)	-	0.0395

注:"+"表示正向指标,"-"表示负向指标

进行赋值;d_j为j指标的信息熵冗余度;e_j为j指标的熵值;p_{ij}为归一化后的值;X_{ij}是为了消除量纲影响而采用极差标准化后的值;x_{ij}为指标的原始值,$i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, m$。

1.4　耦合协调度模型构建

耦合协调指两个及两个以上的子系统在受到内部和外界作用后产生的相互作用和协调程度,用于评价复合生态系统韧性的发展质量。

$$D=\sqrt{CT} \tag{8}$$

$$C=\left[\frac{R_{eco}R_{soc}R_{nat}}{\left(\frac{R_{eco}+R_{soc}+R_{nat}}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{9}$$

$$T=aR_{eco}+bR_{soc}+cR_{nat} \tag{10}$$

式中:D为耦合协调度值;C为耦合度,其值越大表明各子系统之间的相互作用越强;T为协调度,其值越大表明子系统之间的协调程度越高;a、b、c分别表示各子系统韧性的权重。根据王淑佳等[24-25]对国内耦合协调度模型的修订,对耦合协调度进行分类(表2)。

1.5　障碍度模型构建

障碍度模型可诊断复合生态系统韧性的准则层和指标层,识别影响韧性提升的关键因素。

$$H_j=\frac{V_j\times E_j}{\sum_{j=1}^{n}(V_j\times E_j)}\times 100\% \tag{11}$$

$$V_j=1-Y_j \tag{12}$$

表2 耦合协调度模型等级划分

Tab. 2 Grade classification of the coupled coordination degree model

协调等级	区间	协调等级	区间
极度失调	[0, 0.1)	勉强协调	[0.5, 0.6)
严重失调	[0.1, 0.2)	初级协调	[0.6, 0.7)
中度失调	[0.2, 0.3)	中级协调	[0.7, 0.8)
轻度失调	[0.3, 0.4)	良好协调	[0.8, 0.9)
濒临失调	[0.4, 0.5)	优质协调	[0.9, 1]

式中：H_j为障碍度，值越大表明该指标的阻碍作用越强；E_j为因子贡献度，即权重w_j的大小；V_j为指标偏离度，表示j指标标准化后的值Y_j与该指标最大值之间的差距，即与1之间的差距。

2 结果与分析

2.1 宁夏复合生态系统韧性时空演化特征

研究时段内宁夏复合生态系统韧性呈上升趋势，由2010年的0.0614波动提升到2020年的0.1074（图2），除2019年呈负增长外，其他各年均呈正增长，2019年表现出负增长主要是由于该时间断面的社会韧性和自然韧性较2018年有所下降。2020年复合生态系统韧性增长最快，增长率为0.0059，该年经济和自然韧性增速均较快。2010—2020年，经济韧性、社会韧性、自然韧性和复合生态系统韧性总体上均呈上升态势，分别提升了0.0283、0.0104、0.0074和0.0460。社会韧性除2019年和2020年下降外，其余各年均呈上升态势，2018年社会韧性最高，为0.0365。自然韧性水平在2020年增长最快，

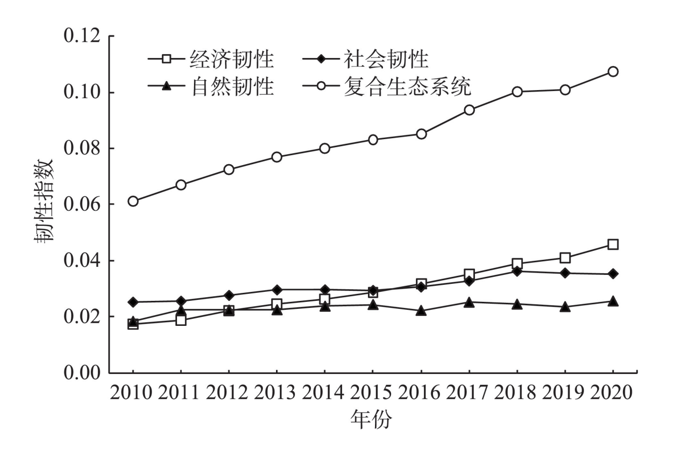


图2 2010—2020年宁夏复合生态系统韧性动态特征

Fig. 2 Dynamic trends of resilience of the composite ecosystems in Ningxia from 2010 to 2020

其余各年增长较为缓慢，且2011年、2012年、2014年和2018年出现下降。经济韧性水平逐年稳步提升，并在2016年超过了社会韧性，在3个子系统中水平最高。

2010—2020年，宁夏复合生态系统呈现出显著的空间分异（图3）。经济韧性方面，北部大部分区县由低韧性提升到高韧性，中部和南部大部分区县由低韧性提升至中等韧性，北部经济韧性整体高于中部和南部。社会韧性方面，宁夏北部和南部部分区县由低韧性和中等韧性提升至高韧性，中部变化幅度小且均处于低韧性和中等韧性，高社会韧性以市区为中心成片分布且北部和南部高于中部。自然韧性方面，东、西、南、北边缘地区由低韧性和中等韧性提升至高韧性，中部部分区县一直处于低韧性，宁夏四周自然韧性高于中部。复合生态系统韧性方面，北部区县主要由低韧性提升至中等韧性和高韧性，中部和南部大部分区县由低韧性提升至中等韧性，永宁和红寺堡一直处于低韧性，北部复合生态系统韧性较中部和南部高。

2.2 宁夏复合生态系统韧性耦合协调性时空特征

2010—2020年宁夏各子系统的耦合度、协调度和耦合协调度如表3所示。2010—2020年宁夏的平均耦合度为0.9879，说明这3个子系统相互作用的影响程度较大，系统之间向着更加有序的方向发展，其中2010—2017年的经济韧性、社会韧性、自然韧性耦合度波动上升，2018—2020年逐年下降，但一直保持在较高水平。2010—2020年，宁夏的协调度逐年上升，由0.0205增加到0.0359，表明这3个子系统的协调性正在逐渐加强。2010—2020年，这3个子系统的耦合协调度也呈上升趋势，由0.1423增加到0.1870，增加了0.0446，但均处于严重失调状态，说明经济和社会的发展加大了资源与环境压力，在宁夏生态脆弱区必须加强经济、社会、自然协调发展。

2010—2020年各区县耦合协调度均有不同程度的提高（图4），灵武提高最多，提升0.1129，红寺堡提升最小，为0.0183。2020年银川市区耦合协调度最高，红寺堡耦合协调度最低，红寺堡经济和社会韧性均得到一定提升，但自然韧性一直处于低韧性，该区域在促进经济和社会发展的同时要注重自然环境的保护。2010—2020年银川市区的耦合协调度由中度失调向轻度失调转变，灵武由严重失调

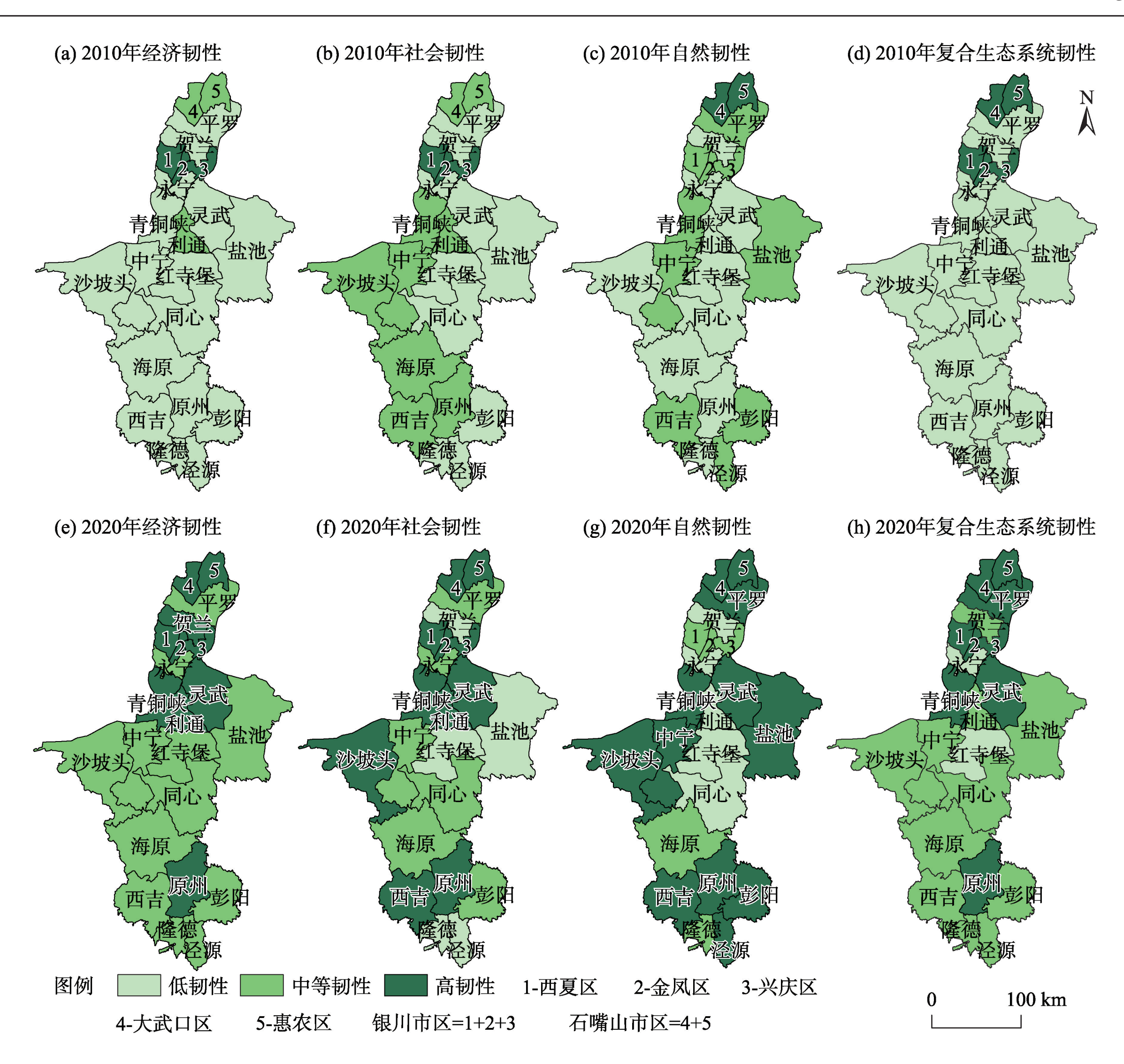


图3　宁夏生态脆弱区经济、社会、自然韧性空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of economic, social and natural resilience in ecologically fragile areas of Ningxia

表3　2010—2020年宁夏子系统的耦合协调度

Tab. 3　Coupling and coordination degree between three subsystems in Ningxia from 2010 to 2020

年份	耦合度	协调度	耦合协调度	年份	耦合度	协调度	耦合协调度
2010	0.9870	0.0205	0.1423	2016	0.9878	0.0285	0.1678
2011	0.9928	0.0225	0.1494	2017	0.9903	0.0313	0.1761
2012	0.9950	0.0243	0.1554	2018	0.9807	0.0336	0.1814
2013	0.9936	0.0258	0.1601	2019	0.9743	0.0338	0.1815
2014	0.9961	0.0268	0.1634	2020	0.9732	0.0359	0.1870
2015	0.9966	0.0278	0.1664				

向中度失调转变,石嘴山市区一直处于中度失调,其余各区县一直处于严重失调。总之,宁夏生态脆弱区的耦合协调度均处于较低水平,各区县今后在发展过程中需要进一步推动经济、社会和生态协调发展。

2.3　宁夏复合生态系统障碍度时空特征分析

准则层相关性分析是辨识影响和提升复合生态系统韧性的重要方法(表4)。宁夏复合生态系统

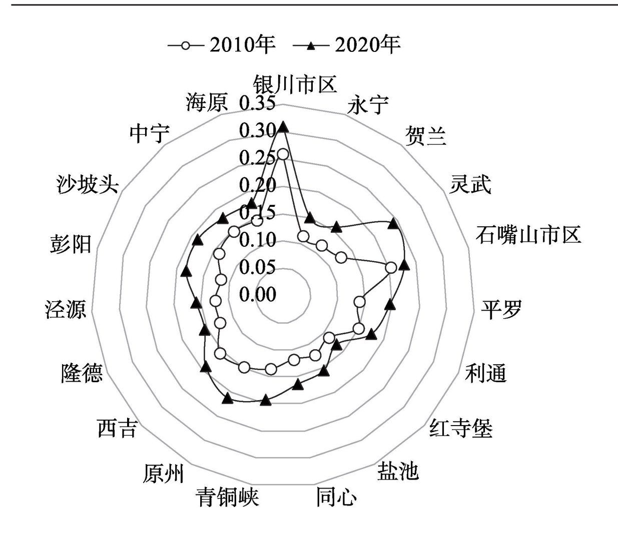


图4 宁夏各区县子系统耦合协调度雷达图

Fig. 4 Radar diagram of coupling coordination degree of subsystem of districts and counties in Ningxia

韧性评价体系准则层B1-B2、B1-B3、B1-B4、B1-B5、B1-B9之间的Pearson相关性系数分别为0.992、0.812、0.861、0.907与0.859，具有极显著的正相关性(P<0.01)，反映出较高的经济韧性对基础设施(B4)、民生改善(B5)、生态治理(B8)和自然环境(B9)均有促进作用，较低的经济韧性对其有抑制作用；B9-B1、B9-B2、B9-B4、B9-B5的相关性系数分别为0.859、0.883、0.826、0.889，通过了0.01水平的相关性检测，B9-B3的相关性系数为0.732，通过了0.05水平的检测，反映出自然韧性受经济韧性和社会韧性影响较大且表现为正相关性，经济韧性、社会韧性与自然韧性之间相互作用、相互影响。

根据相关性分析结果，分别进行准则层和指标层障碍度分析。准则层方面，除经济结构(B1)和经济潜力(B3)障碍度呈波动性下降外，其他准则层障碍度均呈波动性上升趋势(表5)。2015年人口要素的障碍度(B6)最大，为0.1429，环境压力(B7)的变异系数最大，为0.0972，表明各个年份、各个准则层的障碍度变动不大。准则层的平均障碍度由大到小为：人口要素(B6)>经济活力(B2)>生态治理(B8)>自然环境(B9)>民生改善(B5)>经济结构(B1)>基础设施(B4)>经济潜力(B3)>环境压力(B7)。

表4 复合生态系统韧性评价指标准则层之间的相关性系数

Tab. 4 Correlation coefficients between the criteria layers of indicators to evaluate resilience of composite ecosystem

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
B1	1								
B2	0.992**	1							
B3	0.812**	0.772**	1						
B4	0.861**	0.839**	0.925**	1					
B5	0.907**	0.922**	0.613*	0.713*	1				
B6	−0.257	−0.259	−0.142	−0.335	−0.427	1			
B7	−0.4	−0.31	−0.584	−0.324	−0.213	−0.116	1		
B8	0.629*	0.675*	0.177	0.337	0.785**	−0.531	0.111	1	
B9	0.859**	0.883**	0.723*	0.826**	0.889**	−0.295	−0.149	0.611*	1

注：**和*分别表示相关系数在0.01和0.05水平上显著。

表5 2010年、2015年、2020年宁夏各准则层的障碍度

Tab. 5 Obstacle degrees of each criterion layer in Ningxia in 2010, 2015, 2020

年份	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
2010	0.1267	0.1363	0.1061	0.1109	0.1090	0.1392	0.0157	0.1329	0.1232
2015	0.1094	0.1405	0.1106	0.1103	0.1159	0.1429	0.0148	0.1280	0.1275
2020	0.0981	0.1383	0.0866	0.1157	0.1256	0.1424	0.0189	0.1403	0.1342
最大值	0.1273	0.1420	0.1120	0.1148	0.1238	0.1429	0.0175	0.1409	0.1305
平均数	0.1136	0.1396	0.1066	0.1113	0.1157	0.1401	0.0143	0.1328	0.1259
变异系数	0.0825	0.0103	0.0548	0.0180	0.0396	0.0130	0.0972	0.0359	0.0211

注：仅列出2010年、2015年和2020年计算结果，其中最大值、平均数和变异系数按照研究时段逐年数据计算得出。

指标层方面,2010年、2015年与2020年障碍度前5个指标如表6所示:综合能源消耗量(C27)、社会消费品零售额(C3)和卫生技术人员数(C18)在不同年份均排在前5,障碍度较大。来自自然韧性的综合能源消耗量(C27)一直稳居第1,对宁夏复合生态系统韧性提升影响较大,各个区县在今后发展中要合理利用资源,坚持可持续发展。2020年障碍度排名第2到第5均来自社会韧性,较2010年和2015年占比增多且排名上升,反映社会因素影响加大。2020年排名第5来自经济韧性,较2010年和2015年占比和排名均降低,综合宁夏经济韧性提升速度,反映经济因素影响减小。

宁夏各区县障碍度因素存在显著的空间差异。以2020年为例,宁夏各区县排名前3的障碍因素如图5所示:综合能源消耗量(C27)排名第1的县区有14个,主要分布在银川市、宁夏中部和南部,综合能源消耗量(C27)来自自然环境(B9)准则层,表明2020年宁夏复合生态系统韧性提升受自然因素的干扰大。来自社会韧性的交通仓储邮政人员数(C11)排名也比较靠前,分别在5个县区障碍度排名第1和第2,排名第1主要分布在吴忠市,排名第2成片分布在中部和南部,表明社会因素对宁夏复合生态系统提升有一定影响。银川市区作为宁夏的首府,其韧性的提升受自然因素影响较大,排前3名的障碍因素均来自自然韧性,表明银川市区在追求经济发展、社会稳定的同时要注重环境保护。

表6　宁夏不同年份障碍度前5个指标

Tab. 6　Top 5 indicators of barriers in different years in Ningxia

排序	2010年		2015年		2020年	
	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度	障碍因素	障碍度
1	C27	0.0502	C27	0.0515	C27	0.0534
2	C3	0.0497	C6	0.0501	C11	0.0533
3	C18	0.0487	C8	0.0501	C14	0.0522
4	C5	0.0482	C3	0.0497	C18	0.0514
5	C11	0.0474	C18	0.0497	C3	0.0514

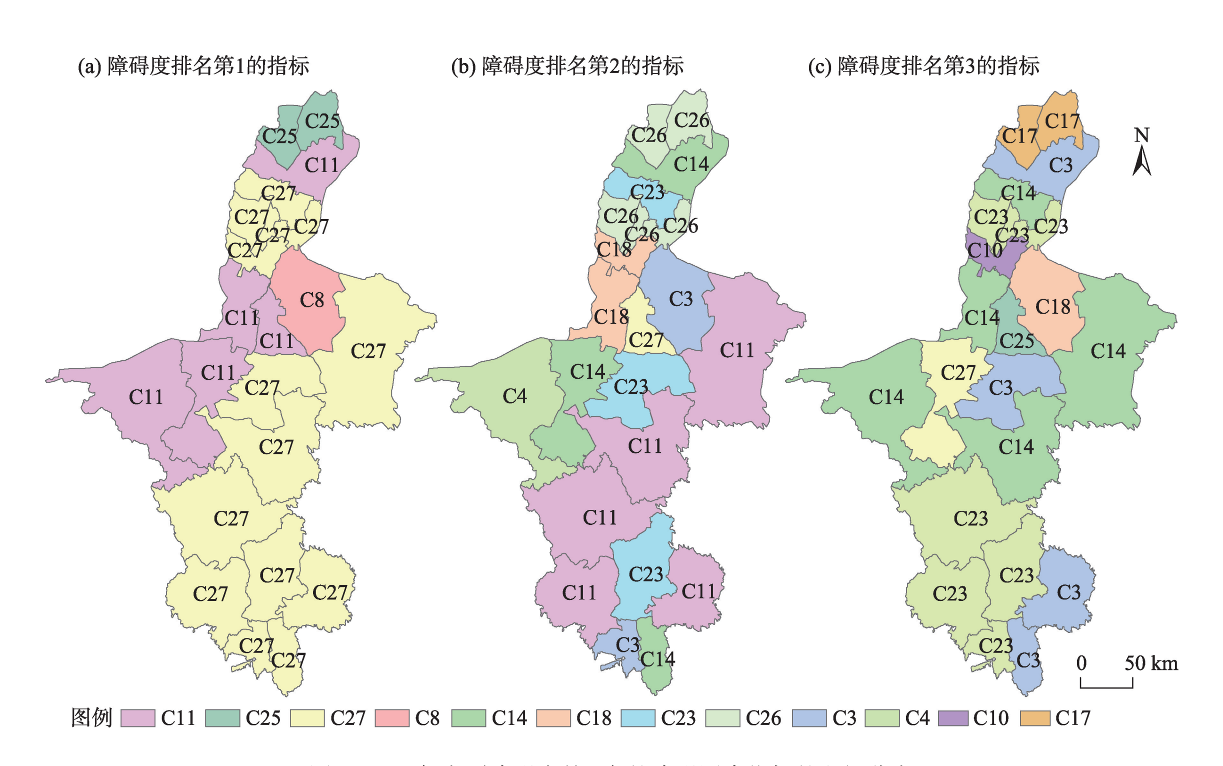


图5　2020年宁夏障碍度前3名的障碍因素指标的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of the top 3 obstacle factors in Ningxia in 2020

3 讨 论

“十二五”期间，宁夏抓住西部大开发和“一带一路”倡议的机遇，迈上了全方位对外开放的新台阶；“十三五”是中国全面建设小康社会的决胜阶段，宁夏坚持稳中求进工作总基调，深化闽宁扶贫协作，2020年各区县均处于中等韧性及以上，为实现全国同步全面建成小康社会打下了坚实基础。同期内，宁夏大力推进民生工程建设和基础设施互联互通，使得宁夏基础设施水平大幅提升，但这些设施建设主要在市区，使得部分区县在2020年社会韧性仍处于低韧性。3个子系统中自然韧性在2020年处于高韧性的区县最多，随着生态文明纳入“五位一体”总体布局，宁夏大力开展生态文明建设。科学布局生产、生活、生态空间，落实“生态立区28条”，划定生态保护红线，统筹抓好“护山、治水、造林、养田、蓄湖、育草、固沙”工作，生态建设取得显著成效。宁夏中部为封育保护区，地处干旱带，自然环境较为恶劣，自然韧性一直处于低韧性，目前主要任务为防沙固沙。由于各个子系统发展良好，复合生态系统韧性也得到一定提升，但由于各个子系统耦合协调度较低，复合生态系统韧性提升速度缓慢。

经济韧性方面，宁夏积极发挥建设先行区战略定位优势和黄河“几”字弯都市圈枢纽区位发展优势，大力发展经济，建设好内陆开放型经济试验区。基于社会韧性的空间变化，构建“一主一带一副”空间格局，“一主”发挥省会的辐射带动作用，建设黄河“几”字弯区域中心城市；“一带”是促进沿黄城市群发展，着力发挥其在黄河上游区域辐射带动作用；“一副”是将固原市建设成为宁夏南部中心城市和旅游城市。生态韧性方面，宁夏作为黄河流域生态保护和高质量发展先行区，立足黄河流域生态保护的协同性和宁夏全域生态系统整体性，建设黄河生态廊道，同时建设贺兰山、罗山、六盘山生态屏障，构建“一河三山”的生态格局。复合生态系统韧性方面，建设黄河生态经济带，辐射带动北部绿色发展区、中部封育保护区、南部水源涵养区高质量发展，同时以“三区”支撑“一带”生态建设，即构建“一带三区”的开发保护格局，形成互促联动、良性发展新局面。

生态脆弱区是一个极其复杂的巨系统，具有整体性、复杂性、开放性和动态性特点，各个子系统要素并非线性平行发展，而是相互作用。鉴于目前生态韧性内涵认知不够明确，生态韧性评估指标选取多集中在自然方面，本文将经济和社会作用纳入生态系统测评中，构建宁夏复合生态系统评价模型，受指标获取的局限性，分析时段较短，且缺少与其他区域横向对比分析，长时序及时序尺度地域差异研究对黄河上游流域生态脆弱区复合生态系统韧性的提升具有优化作用。在后期研究中，应建立相关模型，尽量客观全面地筛选生态韧性评价指标，通过实地调研和多源数据融合等方法获取准确的指标值，同时可以考虑复合生态系统韧性与城镇化、产业发展等的耦合研究。

4 结 论

本文基于经济、社会、自然多维视角构建了宁夏复合生态系统韧性评价体系，运用计量模型和空间分析方法对2010—2020年宁夏复合生态系统韧性进行评估，并对宁夏复合生态系统韧性各个子系统的耦合协调度作了分析，运用相关性分析和障碍度模型诊断影响宁夏韧性的关键因素。宁夏复合生态系统韧性水平上呈稳步提升趋势，但整体水平较低，经济韧性增速最快。高经济韧性北部密集分布，高社会韧性以市区为中心成片分布，高自然韧性主要连片分布在东、西、南、北边缘地区，北部的复合生态系统韧性高于中部和南部。宁夏复合生态系统的耦合度处于较高水平，协调度处于上升趋势但整体水平相对较低，复合生态系统内部各个子系统之间的耦合协调度上升较缓慢且处于严重失调状态，大部分区县仍处于严重失调和中等失调状态。准则层人口要素、经济活力、生态修复对宁夏复合生态系统韧性水平提升影响较大。指标层2020年综合资源消耗量和交通仓储邮政人员数对宁夏复合生态系统韧性提升影响较大。

参考文献(References)：

[1] 中华人民共和国环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要. [EB/OL] (2008- 9- 29) [2022- 07- 26]. http://www. gov.cn/gzdt/2008- 10/09/content_1116192.htm. [Ministry of Environmental Protection, PRC. The outline of the national plan for the protection of ecologically fragile areas[EB/OL] (2008- 9- 29) [202- 07- 26]. http://www.gov.cn/gzdt /2008-10/09 /content_1116192.htm.]

[2] 张云霞, 张金茜, 巩杰. 半干旱区湖盆景观格局脆弱性及其影响因素——以凉城县为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1259-1269. [Zhang Yunxia, Zhang Jinxi, Gong Jie. Landscape pattern vulnerability and its influencing factors on a semi-arid lake basin: A case study of Liangcheng County[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1259-1269.]

[3] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343. [Wang Cong, Wu Xing, Fu Bojie, et al. Ecological restoration in the key ecologically vulnerable regions: Current situation and development direction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7333-7343.]

[4] 张行, 梁小英, 刘迪, 等. 生态脆弱区社会—生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466. [Zhang Xing, Liang Xiaoying, Liu Di, et al. The resilience evolution and scenario simulation of social-ecological landscape in the fragile area[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1450-1466.]

[5] 贾慧, 陈海, 毛南赵, 等. 高度敏感生态脆弱区景观可持续性评价[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1277-1286. [Jia Hui, Chen Hai, Mao Nanzhao, et al. Landscape sustainable development in highly sensitive ecological fragile areas[J]. Resources Science, 2018, 40(6): 1277-1286.]

[6] Walker B, Hollin C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology & Society, 2004, 9(2): 3438-3447.

[7] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(1): 1-23.

[8] Holling C S, Gunderson L. Resilience and Adaptive Cycles[M]. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems.Island Press, 2001: 25-62.

[9] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1-7, 151. [Li Liangang, Zhang Pingyu, Tan Juntao, et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience[J]. Human Geography, 2019, 34(2): 1-7 , 151.]

[10] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口资源与环境, 2017, 27(8): 151-158. [Sun Yang, Zhang Luocheng, Yao Shimou. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River delta region from a socio-ecological perspective[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(8): 151-158.]

[11] 孙鸿鹄, 甄峰. 居民活动视角的城市雾霾灾害韧性评估——以南京市主城区为例[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 788-796. [Sun Honghu, Zhen Feng. Evaluation of urban haze disaster resilience from the perspective of residents' activity: A case study of the main urban area of Nanjing City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(5): 788-796.]

[12] 白立敏. 基于景观格局视角的长春市城市生态韧性评价与优化研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019. [Bai Limin. Evaluation and Optimization of Urban Ecological Resilience in Changchun based on Landscape Pattern[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.]

[13] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126. [Xia Chuyu, Dong Zhaoyingzi, Chen Bin. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 116-126.]

[14] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. [Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991.]

[15] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于"规模—密度—形态"的大连市城市韧性评估[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2315-2328. [Xiu Chunliang, Wei Ye, Wang Qi. Evaluation of urban resilience of Dalian City based on the perspective of "Size-Density-Morphology"[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2315-2328.]

[16] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1193-1207. [Peng Chong, Lin Yingzi, Gu Chaolin. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River[J]. Geographic Research, 2018, 37(6): 1193-1207.]

[17] 刘志敏, 叶超. 社会—生态韧性视角下城乡治理的逻辑框架[J]. 地理科学进展, 2021, 40(1): 95-103. [Liu Zhimin, Ye Chao. A logical framework of rural-urban governance from the perspective of social-ecological resilience[J]. Progress in Geography, 2021, 40(1): 95-103.]

[18] 宁夏回族自治区人民政府. 宁夏回族自治区自然资源保护和利用"十四五"规划. [EB/OL](2021-9-21)[2022-07-26]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/qzfwj/202109/t20210924_3045970.html. [The People's Government of the Ningxia Hui Autonomous Region. The 14th Five-Year Plan for the Protection and utilization of natural resources in the Ningxia Hui Autonomous Region. [EB/OL](2021-9-21)[2022-07-26]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/qzfwj/202109/t20210924_30459 70.html.]

[19] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61. [Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2022, 42(8): 51-61.]

[20] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7344-7355. [Wang Xiaofeng, Ma Xue, Feng Xiaoming, et al. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7344-7355.]

[21] 孙桂丽, 陆海燕, 郑佳翔, 等. 新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 258-269. [Sun Guili, Lu Haiyan, Zheng Jiaxiang, et al. Spatio-temporal variation of ecological vulnerability in Xinjiang and driving force analysis[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 258-269.]

[22] 朱媛媛, 汪紫薇, 顾江, 等. 基于"乡土—生态"系统韧性的红色旅游资源利用空间格局优化研究——以大别山革命老区为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(7): 1700-1717. [Zhu Yuanyuan, Wang Ziwei, Gu Jiang, et al. The spatial optimization of red tourism resources utilization based on the resilience of "ruralism-ecology" system: A case study of Dabie Mountains Old Revolutionary Base Area [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(7): 1700−1717.]

[23] 马慧强, 杨俊, 李哲. 太原市城市复合生态系统调节服务时空格局演化及驱动机制研究[J]. 地理科学, 2021, 41(3): 463−472. [Ma Huiqiang, Yang Jun, Li Zhe. Evolution and driving mechanism of temporal and spatial patterns of regulation services of urban complex ecosystem in Taiyuan[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 463−472.]

[24] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793−810. [Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793−810.]

[25] 刘海龙, 唐飞, 丁娅楠, 等. 山西省县域高质量发展与生态系统服务耦合的时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1234−1245. [Liu Hailong, Tang Fei, Ding Yanan, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of the coupling between county high-quality development and ecosystem services in Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1234−1245.]

Spatio-temporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: A case study in Ningxia

YANG Hang, HOU Jingwei, MA Caihong, YANG Chen, WANG Yanjuan

(School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Improving the disturbance resistance and restoration of ecologically fragile areas is an important part of ecological civilization construction. The key factors affecting ecological resilience were diagnosed with the help of coupling coordination model, correlation analysis, and obstacle model. Based on the economic, social, and natural multidimensional perspective of composite ecosystem resilience assessment model, using entropy method and GIS spatial analysis, in 2009−2019 Ningxia composite ecosystem resilience difference analysis was done. The results show that: (1) The resilience of Ningxia's composite ecosystem is on the rise, but the overall level is low, and economic resilience grows the fastest. High economic resilience is densely distributed in the north, and high social resilience is centered in the city. High natural resilience is mainly distributed in the east, south, west, and north corners, and the northern composite ecosystem is more resilient than that in the central and southern regions. (2) The coupling degree of the composite ecosystem in Ningxia is relatively high, but the coordination degree is relatively low. The coupling and coordination degree improves slowly during the research period, and most districts and counties are still in a state of serious and moderate imbalance. (3) The economic structure shows a strong positive correlation with the economic potential, infrastructure, the improvement of people's livelihood, and the natural environment. Population, environmental stress, and economic vitality in the criterion layer have a significant impact on the composite ecosystem's resilience, while the index layer's total energy consumption and the number of workers in the transportation, storage, and postal sectors have a significant impact on the resilience of the majority of districts and counties. In the future, it is necessary to actively play the positive synergistic effect of various influencing factors to rapidly improve the resilience of the composite ecosystem in Ningxia, to effectively help the ecological protection and the construction of a high-quality pilot zone in the Yellow River.

Keywords: resilience of composite ecosystems; coupling coordination degree; correlation analysis; obstacle degree model; eecological fragile areas; upper reaches of the Yellow River